

长江经济带农业生态环境协调可持续发展评价

甘黎黎, 还清菁

(华东交通大学人文社会科学学院, 南昌 330013)

摘要: [目的] 评价长江经济带农业生态环境的协调可持续发展能力, 为长江经济带实现绿色发展和全面推进乡村振兴提供科学依据。 [方法] 基于2002—2022年长江经济带11个省市农业生态环境的面板数据, 构建含18个二级指标的长江经济带农业生态环境协调可持续发展评价指标体系, 采用熵值法、综合评价法和空间自相关分析了其可持续性、协调性及时空格局演变。 [结果] (1) 长江经济带农业生态环境可持续性整体稳步提升, 后10年增长显著, 但各子系统 and 各省市之间发展不均衡; (2) 系统协调指数整体上处于平稳状态, 大部分省份协调性和整体一致, 上游的协调发展水平明显优于下游地区; (3) 长江经济带各省的农业生态环境协调性整体上从早期的随机分布转向了明显的空间关联性, 中游地区尤其湖北省呈现高一高聚集, 形成“强联动”格局。 [结论] 2002—2022年长江经济带农业生态环境协调可持续发展水平稳步提升, 空间关联度增强, 建议多产业融合发展, 多系统科学统筹, 多省市区域合作, 多主体协同共治推动长江经济带农业绿色发展。

关键词: 长江经济带; 农业生态环境; 可持续性; 协调性; 时空分异

中图分类号: F323.2; X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0290-12

Evaluation of coordinated and sustainable development of agricultural ecological environment in Yangtze River Economic Belt

Gan Lili, Huan Qingjing

(School of Humanities and Social Sciences, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: [Objective] This study aims to evaluate the coordinated and sustainable development capacity of the agricultural ecological environment in the Yangtze River Economic Belt, providing a scientific basis for facilitating green development and comprehensively promoting rural revitalization in the region. [Methods] Based on panel data from 11 provinces and municipalities in the Yangtze River Economic Belt from 2002 to 2022, an evaluation index system for the coordinated and sustainable development of the agricultural ecological environment was constructed, comprising 18 secondary indicators. The entropy method, comprehensive evaluation method, and spatial autocorrelation analysis were employed to assess sustainability, coordination, and spatiotemporal evolution patterns. [Results] (1) The overall sustainability of the agricultural ecological environment in the Yangtze River Economic Belt steadily improved, with significant growth in the latter decade, though development remained uneven across subsystems and regions. (2) The system coordination index remained generally stable, with most provinces exhibiting consistent coordination levels. The upstream regions demonstrated notably better coordinated development than downstream areas. (3) The coordination of agricultural ecological environment across provinces in the Yangtze River Economic Belt shifted from an initially random distribution to a distinct spatial correlation. The central region, particularly Hubei Province, exhibited high-high clustering, forming a “strong linkage” pattern. [Conclusion] From 2002 to 2022, the coordinated and sustainable development level of the agricultural

收稿日期: 2025-05-22

修回日期: 2025-06-12

接受日期: 2025-06-20

资助项目: 国家社会科学基金(20BGL227)的阶段性成果; 江西省研究生创新专项资金项目(YC2024-S445)

第一作者: 甘黎黎(1981—), 女, 湖北宜昌人, 博士, 教授, 研究方向为公共政策与管理、环境资源法。E-mail: orange.gll@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

ecological environment in the Yangtze River Economic Belt has steadily improved, with strengthened spatial correlation. It is recommended to promote agricultural green development through diversified industrial integration, scientific coordination across multiple systems, cross-provincial collaboration, and multi-stakeholder cooperative governance.

Keywords: Yangtze River Economic Belt; agricultural ecological environment; sustainability; coordination; spatiotemporal differentiation

党的二十大报告在区域协调发展、绿色发展等章节指出,协调发展要推进长江经济带发展、长三角一体化发展。习近平总书记也多次在长江经济带发展座谈会和考察中指出要推动长江经济带农业农村绿色发展。中国共产党第二十届中央委员会第三次全体会议通过的《中共中央关于进一步全面深化改革推进中国式现代化的决定》第十九条也指出要优化长江经济带发展、黄河流域生态保护和高质量发展机制。上述重要论述为长江经济带农业农村绿色发展和农业生态环境实现协调可持续发展提供了科学指引。长江经济带依托长江水道,横跨我国东中西三大区域,包含上海、重庆两个直辖市和江苏、浙江、安徽等9个省,共11个地区,既是国家重要的粮食生产基地,也是维系长江流域生态平衡的安全屏障。

然而,该区域的农业发展模式与生态环境之间的矛盾日益突出:一方面,流域单位面积化肥施用量为全国平均水平的1.3倍,农药使用强度超过国际安全阈值1.8倍;畜禽养殖污染物排放总量超出区域环境容量28.7%,其中总氮、总磷负荷分别占农业源排放的43.6%和51.2%,农业面源污染对流域水体污染贡献率升至47.8%。另一方面,农村劳动力外流率达36.4%,农村劳动力外流导致传统生态农业技术传承断裂,规模化经营进一步放大面源污染风险。因此,保护好农业生态环境是长江经济带实现协调可持续发展的重要基础和必然途径,也对全面推进长江经济带乡村振兴和农业农村绿色发展尤为重要。

从概念内涵看,长江经济带农业生态环境协调可持续发展定义为农业系统与生态环境系统在长江流域空间范围内的耦合协同过程,强调资源利用效率、环境承载力和生态服务功能的动态平衡,指在保障区域农业经济稳定增长的同时,实现生态环境的保护与修复,促进两者的良性互动与协调发展^[1-2]。在农业生态环境评估领域,从指标体系看,国外形成了相对系统有逻辑的指标体系,经济合作与发展组织首次开创性提出压力-状态-响应模型(Pressure-State-Response, PSR),国外学者还提出生态足迹体系、生态承载力、环境可持续指数、环境绩效指数、环境脆弱性指数等有代表性的指标体系^[3-4]。国内学者起步较

晚,但搭建了更符合中国实际的评估体系,如中国科学院在2007年可持续发展报告上提出资源环境综合绩效指数^[5],基于国外PSR模型建立的农村生态环境质量评价指标体系^[6-8]、三生系统的农业生态协调可持续发展评价等^[9-12]。从研究方法看,主要有综合熵值法^[13-14]、耦合协调发展模型^[15-16]、系统协调度模型^[17]、面板数据分析^[18-19]、数据包络分析法等^[20]多样化的研究范式,为定量分析和政策制定提供了有力支持。从研究尺度看,相关研究涵盖了从宏观到微观的多个层面,既有基于流域^[21]、省域^[22]展开的宏观尺度分析,也有以县域^[23]、局部地区^[24]开展的微观尺度分析或者典型案例研究^[25],为具体实践提供了指导。还有学者从人口、社会、经济、环境、资源5个维度采用熵值法、耦合协调模型分析长江经济带农业可持续发展水平^[26]。

综上所述,关于长江经济带农业生态环境协调可持续发展的研究在概念内涵、指标体系、研究方法和研究尺度等方面取得了显著进展。国外学者较早地对生态环境评价进行指标体系搭建,形成了比较完整系统的指标体系,但国内学者的体系构建更适用。但仍有以下关键问题未解决:其一,时空动态性不足,多数研究基于短时序数据,无法反映长期趋势;其二,空间关联性忽略,耦合协调模型未考虑地理邻近性对系统协调度的影响;其三,政策协同缺位,现有建议多聚焦单一省份,缺乏跨区域联动机制设计。因此,本文基于长江经济带2002—2022年的统计数据,从生活、生产和生态3个环境子系统构建评价指标体系,运用熵权法客观评价长江经济带11个省市21年间农业生态环境协调可持续性发展演变规律,更全面地反映长江经济带农业生态环境的最新动态和长期趋势,并且创新性引入空间自相关分析,探讨农业生态环境协调性的空间关联性和集聚格局,在政策建议上更强调跨区域协同治理和多主体联动,以期能为长江经济带农业绿色发展、跨域生态环境治理决策提供一定参考。

1 研究材料与方法

1.1 研究区概况

长江经济带横跨中国东中西三部,包含上海、重

庆、江苏、浙江等 11 个省市,总面积为 205.23 万 km²,总人口约 6 亿,其中 2022 年末乡村人口为 2.15 亿,人口和生产总值均超过全国的四成。按上、中、下游划分,上游地区包括重庆、四川、贵州、云南,面积占 55.4%,山地丘陵为主,生态屏障功能突出;中游地区包括江西、湖北、湖南,面积占 27.5%,是农业主产区和枢纽经济带;下游地区包括上海、江苏、浙江、安徽,面积占 17.1%,是城镇化与集约化农业高地。截至 2022 年,经济方面,实现生产总值 55.98 万亿元,农业产值占比超全国 35%;农业生态环境基础方面,农村居民人均水资源量 1 797.23 m³,高于全国均值,长江流域国控断面水质优良比例达 98.1%,为农业可持续性提供生态基底,农村人均用电量 1 291.22 kW·h,反映出农业机械化与设施化水平较高^[19];农业农村发展现状方面,农村居民人均可支配收入实现 2.285 3 万元,同比增长 6.1%,人均消费支出为 1.908 6 万元,同比增长 5.7%。耕地空间持续减少,农业与生态空间冲突、竞争加剧,加之政策约束与生态退化间接威胁农业生产,已成为长江经济带的关键问题,亟需协调农业发展与生态安全格局^[27]。

1.2 数据来源

本文以长江经济带 9 省 2 市农业相关的 2002—2022 年统计数据为数据来源,数据大部分来源于 2003—2023 年《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国环境统计年鉴》,少部分数据从各省市统计年鉴和统计公报中补充,间接指标数据均通过基础数据计算而得。对于个别缺失的数据,利用近邻年份或相似指标数据代替。

1.3 研究方法

1.3.1 指标体系构建 农业生态环境的协调可持续发展力受到农民乡居生活、农业生产和生态保护等多方面的综合影响。因此,借鉴前文国内外生态环境的指标体系^[13-17],结合长江经济带农业生态环境发展现状,坚持以人为本、科学性、可获取性等原则,从生活环境、生产环境和生态环境 3 个子系统入手,构建包含 18 个二级指标的农业生态环境协调可持续发展评价指标体系(表 1)。

(1) 生活环境子系统是衡量乡村生活质量和水平的重要维度,它不仅呈现了乡村人口的收入和消费水平,还涵盖了农村水电、医疗、通信等公共基础设施的建设水平。乡居生活是农民主体对农业生态空间进行消费和利用的过程,这一过程在很大程度上推动了农业生态环境的可持续发展。因此,该子系统选取 6 个正向指标,具体包括:农村居民人均可支配收入、农村居民人均消费支出、乡村电力设施水平、乡村医疗条件、乡村通信设施水平以及农村热水器的普及率。这

些指标从经济、生活设施等多个方面综合呈现乡村生活环境的改善程度和农民生活质量的提升水平。

(2) 生产环境子系统直接体现了农业生产效率以及生产过程中对环境的影响。我国农业生态环境污染的重要原因之一是农药、化肥、地膜的不合理使用,因此在该子系统中选取 3 个负向指标,即农用化肥施用强度、农药施用强度和地膜覆盖率,以揭示农业生产活动对生态环境的压力。同时,为了衡量农业生产效率,还选取 3 个正向指标,分别是粮食生产率、有效灌溉率和农业机械化水平。这些指标从投入和产出两个角度综合呈现农业生产过程中的资源利用效率和环境友好程度。

(3) 生态环境子系统是农业生态环境可持续发展的基础,是维系农业生态环境绿色发展的重要保障,能够直观呈现长江经济带农业生态环境的整体状况。因此,该子系统选取 6 个与生态环境直接相关的正向指标,包括水土流失治理面积、人均水资源量、人均耕地面积、森林覆盖率、自然保护区面积和生态环境补水用水总量。这些指标从生态保护、资源利用等多个方面综合衡量农业生态环境的质量和可持续性。

1.3.2 数据标准化和指标权重确定

(1) 数据标准化。已知上文的指标体系含有 15 个正向指标和 3 个负向指标(表 1)。

正向指标的标准化公式为:

$$y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (X_i = x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (1)$$

负向指标的标准化公式为:

$$y_{ij} = \frac{\max(X_i) - X_{ij}}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (X_i = x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为*i*省市*j*指标值; $\min(X_i)$ 和 $\max(X_i)$ 为*i*省市*j*指标的最小值和最大值; y_{ij} 为标准化后的数据。

(2) 确定权重。采取熵值法,计算出长江经济带农业生态环境可持续性中各项指标的权重,保障数据与结果的客观性,具体步骤:

对标准化后的数据 y_{ij} 进行坐标平移,幅度*C*取 0.01,计算公式如下:

$$Y_{ij} = y_{ij} + C \quad (3)$$

式中: Y_{ij} 为 y_{ij} 进行微小平移(+0.01)后的数据。

第*i*年份下第*j*评价指标占该指标的比重 P_{ij} 计算公式如下:

$$P_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^n (Y_{ij}) \quad (4)$$

式中: P_{ij} 为第*i*年份下第*j*评价指标占该指标的比重。

第 j 项指标的熵值计算公式如下:

$$E_j = \frac{1}{-\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (5)$$

式中: n 为评价对象个数; E_j 为第 j 个指标的熵值。

确定各项指标权重 W_j , 其中差异系数为 $(1-E_j)$,

计算公式如下:

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{i=1}^m (1 - E_j)} \quad (6)$$

式中: W_j 为各项指标权重。

表 1 长江经济带农业生态环境协调可持续发展评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for coordinated and sustainable development of agricultural ecological environment in Yangtze River Economic Belt

准则层	指标层	指标解释及计算方法	指标性质	权重系数/%
生活环境子系统	农村居民人均可支配收入	反映地区农村居民收入的平均水平(元/人)	+	6.63
	农村居民人均消费支出	反映农民生活水平和质量(元/人)	+	6.46
	乡村电力设施水平	农村用电量/乡村人口(kW·h/人)	+	21.91
	乡村医疗条件	村卫生室个数/乡村人口(个/万人)	+	3.96
	乡村通信设施水平	农村居民家庭平均每百户移动电话拥有量(部/百户)	+	3.51
	农村热水器	农村居民家庭平均每百户年末热水器拥有量(台/百户)	+	5.56
	生产环境子系统	农用化肥施用强度	农用化肥施用量/总播种面积(t/hm ²)	-
农药施用强度		农药施用量/总播种面积(t/hm ²)	-	1.82
地膜覆盖率		地膜覆盖面积/总播种面积(%)	-	0.14
粮食生产率		粮食总产量/粮食播种面积(t/hm ²)	+	2.01
有效灌溉率		有效灌溉面积/耕地面积(%)	+	3.60
农业机械化率		反映生产技术能力强弱(kW·h/hm ²)	+	3.67
生态环境子系统	水土流失治理面积	反映地区生态环境保护措施的实施力度(万 hm ²)	+	5.02
	人均水资源量	反映国家可利用淡水资源平均到每个人的占有量(m ³ /人)	+	3.96
	人均耕地面积	按乡村人口计算的人均占有耕地面积(m ² /人)	+	3.33
	森林覆盖率	森林面积占土地总面积的比率(%)	+	3.04
	自然保护区面积	保护各种重要的生态系统及其环境(万 hm ²)	+	13.39
	生态环境补水用水量总量	生态补水是保护治理河湖的重要举措(亿 m ³)	+	9.30

基于上述步骤,具体权重计算结果见表 1 的权重系数。

1.3.3 可持续性和协调性测算

(1) 可持续性指数测度。可持续性评价系统包含生活、生产和生态 3 个子系统,本文以综合评价法对可持续性指数进行评价,计算步骤如下:

整体可持续性指数:

$$USI = \sum_{i=1}^m Y_{ij} W_j \quad (7)$$

生活环境子系统可持续性指数:

$$LSI = \sum_{i=1}^m l_{ij} W_j \quad (8)$$

生产环境子系统可持续性指数:

$$PSI = \sum_{i=1}^m p_{ij} W_j \quad (9)$$

生态环境子系统可持续性指数:

$$ESI = \sum_{i=1}^m e_{ij} W_j \quad (10)$$

式中: l_{ij}, p_{ij}, e_{ij} 分别为生活、生产、生态环境子系统各要素标准化值; LSI(Living Sustainability Index), PSI

(Production Sustainability Index), ESI (Ecological Sustainability Index) 为各子系统可持续性指数, 值越大表示指数越高; USI (Universal Sustainability Index) 为整体的可持续性指数, USI 值越大说明农业生态环境可持续性越强, 反之则表示不可持续发展。因为标准化并平移后的数据 Y_{ij} 和权重 W_j 介于 0~1, 所以可持续性指数的区间为 [0, 1]。

(2) 协调指数测度。参考国内已有研究的乡村人居环境协调指数测度^[13], 本研究从整体视角采用系统协调度指数模型探究长江经济带农业生态环境系统 3 个子系统的协调性程度, 计算步骤如下:

$$CI = \frac{LSI + PSI + ESI}{\sqrt{LSI^2 + PSI^2 + ESI^2}} \quad (11)$$

式中: CI 表示系统协调指数; LSI, PSI, ESI 分别表示生活环境、生产环境和生态环境各子系统可持续性指数的评价分值。根据公式(11)计算可以得出系统协调指数的区间为 $(1, \sqrt{3}]$, 当 LSI=PSI=ESI 即各子系统可持续性指数相等时, 取得最大值 $\sqrt{3}$, 因此本研究将系统协调指数 CI 值分为 5 个等级(表 2)。

表 2 长江经济带农业生态环境系统协调指数等级划分

Table 2 Classification of coordination index grades of agricultural ecological environment system in Yangtze River Economic Belt

协调指数 CI	协调程度	协调等级	协调指数 CI	协调程度	协调等级
(1.0,1.1)	极度失调	高度失调	[1.4,1.5)	勉强协调	基本协调
[1.1,1.2)	严重失调		[1.5,1.6)	初级协调	
[1.2,1.3)	中度失调	中度失调	[1.6,1.7)	中级协调	中度协调
[1.3,1.4)	轻度失调		[1.7,√3)	优质协调	高度协调

1.3.4 空间自相关分析 为进一步分析生活-生产-生态 3 个子系统的协调性程度,即 CI 的全局空间关联程度和空间异质性,探究长江经济带农业生态环境系统协调指数 CI 是否存在空间聚集效应,本研究使用 ArcGIS 软件,采用全局莫兰指数(Global Moran's I)和局部莫兰指数(Local Moran's I)进行测度,计算步骤如下:

(1) 全局空间自相关。

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

(2) 局部空间自相关。

$$L = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n}, i \neq j \quad (13)$$

式中: n 为空间单元总个数; w_{ij} 为空间权重值; x_i 和 x_j 分别为 i 省和 j 省的农业生态环境协调指数; \bar{x} 为长江经济带所有省份的农业生态环境协调指数的均值;Moran's I 为全局莫兰指数; L 为 i 省的局部莫兰指数。

2 结果与分析

2.1 长江经济带农业生态环境可持续性指数分析

2.1.1 农业生态环境可持续性时序特征 通过将公式(1)~(6)熵值法计算的权重(表1)和2002—2022年长江经济带各省市的指标数据代入公式(7)~(10)可得出可持续性指数(图1),包括整体的USI值和3个子系统评分LSI值、PSI值、ESI值。

从整体看,由图1可知,2002—2022年的长江经济带农业生态环境可持续性指数呈现稳步直线上升趋势,由2002年的0.17提升至2022年0.4,说明近20年来长江经济带的农业生态环境得到整体改善。分时间阶段来看,2002—2011年前10年整体指数提升到2011年的0.26,上升了0.08左右,而2011—2020年后10年提升到0.4,上升了0.15左右,后10年的提升速率比前10年翻了一番,可见“十二五”以来我国加大了

对于长江经济带的开发和生态保护投入。2020—2022年可持续指数基本保持平缓,预计近几年长江经济带的农业生态环境可持续性水平达到瓶颈或稳定状态。

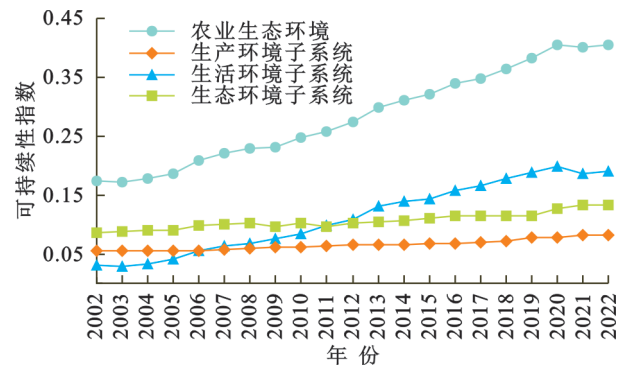


图1 2002—2022年长江经济带农业生态环境可持续性评价分值

Fig. 1 Sustainability evaluation scores of agricultural ecological environment in Yangtze River Economic Belt (2002—2022)

从子系统来看,生活环境子系统评价分值的变化幅度基本跟随整体变化趋势,提升幅度在3个子系统中最大,由2002年的0.03提升到2022年的0.19。其中2002—2022年农村居民人均可支配收入由2 918元提升至22 853元,翻了约8倍;人均消费支出由2 226元上升至19 086元,翻了约8.6倍,生活环境子系统的快速提升主要得益于经济收入和消费水平的显著增长,不仅反映了农村居民生活质量的显著改善,也显示出政策对农村经济发展的积极推动作用。生态环境子系统的评价分值即ESI值波动式缓慢上升,2002—2011年基本在0.08~0.10波动上升,偶有下跌;2012年后从0.10逐年上升至0.13,从2011年起ESI值落后于LSI值;2020—2022年,小幅度提升。可见政府在农业生态环境治理方面的持续投入取得稳定成效,但后10年的提升幅度和对综合分值的影响落后于生活环境子系统。这可能是由于气候变化带来的挑战和政策执行过程中的一些问题,如极端气候事件导致的生态破坏,部分地区生态治理资金投入不足、政策落实不到位等。水土流失治理面积由239万 hm^2 扩大至551万 hm^2 ,翻了约2.3倍,长江流域的水土流失治理对农业生态环境改善至关重要。生产

环境子系统的分值是3个子系统中变化趋势最平缓的,由0.056至0.081,提升幅度最小。究其原因,主要是生产指标里包含的农药化肥地膜3个负向指标和生产率、灌溉率、机械化率3个正向指标作用的变动抵消。农用化肥施用强度从每公顷0.27 t上升至2017年的0.32 t再下降到2022年的0.26 t,呈现上升再下降趋势。农业机械化率由29%提升至59%,由于正负向指标的变动相抵,导致PSI值变化幅度最小,气候变化可能影响灌溉条件和农业生产效率,政策调整则可能影响农业生产的投入方向和技术选择。

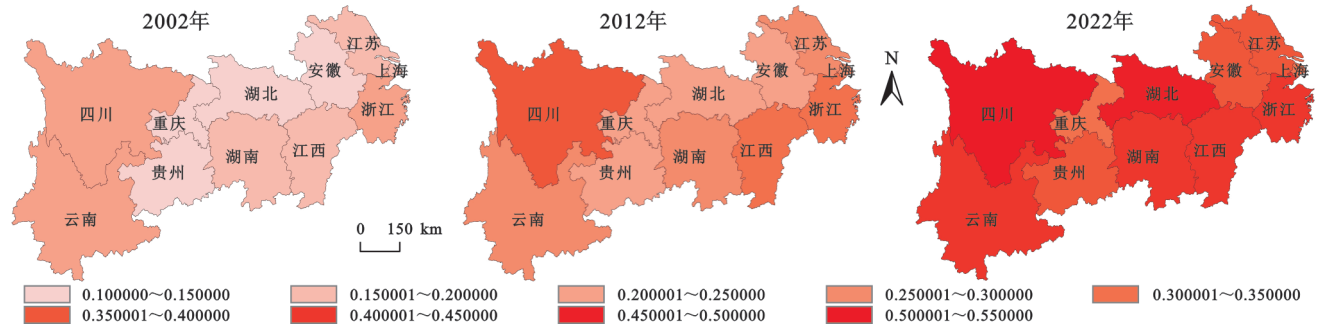
综上,长江经济带农业生态环境可持续性整体上稳步提升,但后10年增长趋势快于前10年,子系统中尤其生态和生产环境子系统有改进空间。

2.1.2 农业生态环境可持续性空间特征 根据长江经济带农业生态环境整体可持续性指数USI值的计算结果,截取2002年、2012年和2022年长江经济带11省市农业生态环境的可持续性指数,运用ArcGIS 10.8绘制可视化空间分异图(图2)。

从空间维度来看,在整个研究时段内,长江经济带各省市的农业生态环境可持续性评价分值呈现递增趋势,这表明整体上农业生态环境的可持续性在逐步提升。然而,省际差异显著,且这种差异随着时间推移和可持续性指数的增长而逐渐扩大。具体而言,中游地区的可持续性指数整体增长幅度最大,显示出该地区在农业生态环境可持续发展方面取得了显著成效;下游地区的增长幅度相对较小,可能与该地区经济高度发达、城市化水平较高,导致农业生态环境面临较大压力有关;上游地区的增长幅度则介于中游和下游之间。在所有省市中,四川省的USI值整体最高,2022年达到0.524,这表明四川省在农业生态环境可持续性方面表现突出,可能得益于其在生态保护、农业绿色发展等方面的积极努力和有

效政策。而重庆市的USI值整体最低,2022年低至倒数第二(0.333 5),上海市的USI值在2022年更是降至最低,仅为0.317 7。这一现象可能与直辖市更注重城市经济发展,而在农业生态环境方面政府和社会力量的投入相对不足有关,导致两个直辖市的农业生态环境可持续水平相对较低。

从时间维度来看,2002年长江经济带农业生态环境可持续性指数均值为0.17,整体可持续性指数较低,上中下游差异较小,加权平均的USI值也较为均衡。这表明在研究初期,长江经济带各地区的农业生态环境可持续性处于相对较低且较为相似的水平。到了2012年,USI均值提升至0.27,整体水平有了一定幅度的提升,但上游地区出现了两极分化现象,四川和云南的USI值位于高区间,而贵州和重庆的USI值则位于低区间。与此同时,中下游地区差异显著收敛,这说明在2002—2012年这10年间,我国对长江经济带中下游地区的开发力度和环境治理取得了显著成效,有效促进了这些地区农业生态环境的改善。然而,到了2022年,USI均值进一步提升至0.4,可持续性指数持续增长,尤其是中游地区增长幅度最大,江西、湖北、湖南三省的USI值都达到了高区间。这表明在2012—2022年这10年间,中游地区在农业生态环境可持续发展方面成效最为显著,可能与其在生态保护、农业产业结构调整、绿色农业发展等方面的积极作为密切相关。相比之下,上游地区除了四川省外,其他省市的可持续性指数增长放缓;下游地区整体增长幅度也较小,这可能与这些地区面临的经济发展与生态保护之间的矛盾、资源分配不均、政策执行力度差异等因素有关。整体而言,各地区农业生态环境可持续发展水平的差异呈现出扩大趋势,这不仅影响了区域间的协调发展,也可能对长江经济带整体的生态安全和可持续发展带来挑战。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2020)4619号的标准地图制作,底图未做修改。

图2 2002年、2012年、2022年长江经济带农业生态环境整体可持续性指数(USI)空间分异
Fig. 2 Spatial differentiation of overall sustainability index (USI) of agricultural ecological environment in Yangtze River Economic Belt in 2002, 2012, and 2022

2.2 长江经济带农业生态环境协调指数分析

2.2.1 CI协调指数时序特征 由图3可知,2002—

2022年长江经济带农业生态环境整体系统协调指数CI在1.59~1.70的区间内,由基本协调水平提升到高

度协调,整体上处于平稳状态。进一步从细化的图 4 观察,2002—2011 年整体逐步上升,到 2011 年达到峰值 1.701 2,刚达到高度协调水平,说明前 10 年这个时间段长江经济带的农业生态环境 3 个子系统的指数都是低水平,提升空间大,但生活环境 LSI 值、生产环境 PSI 值、生态环境 ESI 值三者同步提升,实现了协调发展。2012—2019 年农业生态环境协调指数基本上逐年下降,主要源于该时间段生产环境子系统 PSI 值和生态环境子系统水平 ESI 值的提升速率跟不上生活环境子系统 LSI 值,发展不均衡,难以三者同步提升,整体协调指数 CI 值下降。这一阶段的振荡可能受到气候变化和政策调整的双重影响,例如,极端气候事件可能导致生态环境子系统(ESI)的评价分值下降,而政策调整如“长江大保护”战略可能影响生产环境子系统(PSI)的发展方向。2020—2022 年近 3 年协调性有小幅回升,增幅较小,主要源于生活环境 LSI 值增速放缓和近几年长江经济带区域生态环境治理的优化,这一阶段的稳定提升得益于政府在生态环境治理方面的持续投入和政策支持,尽管外部不确定性因素,如气候变化等仍然存在,但治理成效逐渐显现。因此,生活环境、生产环境、生态环境三个子系统不能单一子系统过快增长,而要三者协调增长、统筹发展,才能更好地改善长江经济带农业生态环境质量。

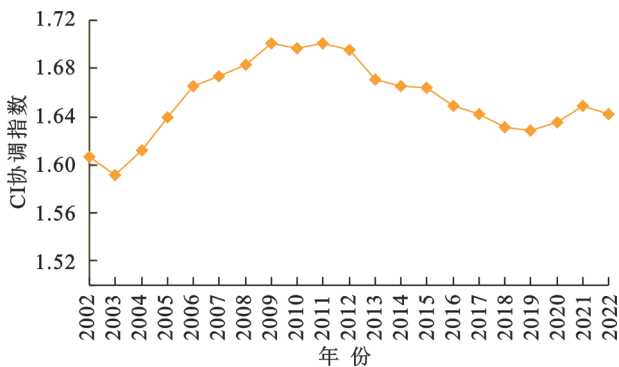


图 3 2002—2022 年长江经济带农业生态环境整体系统协调指数

Fig. 3 Coordination index for agricultural ecological environment in Yangtze River Economic Belt (2002—2022)

2.2.2 CI 协调指数空间特征 根据 2002—2022 年长江经济带农业生态环境各省市的系统协调指数 CI 值的计算结果,绘制长江经济带 11 省市 CI 系统协调指数区间细化图(图 4)。

明显可见,大部分省市主要是长江经济带中上游的协调指数变化和整体协调指数变化趋势是一致的,而下游地区上海、江苏、浙江加上云南省、贵州省的协调指数变化幅度比较大,和整体协调指数曲线偏离较大、不吻合。这意味着长江经济带大部分省

市农业生态环境整体协调指数处于平稳增长状态,由基本协调水平提升到高度协调,3 个子系统之间的协调性较高,呈现出比较均衡的发展态势,说明长江经济带在农业生态环境的整体性政策规划上有较高的协调性。

具体来看,上游地区的协调指数上涨趋势最为明显,其中,四川和云南两省的协调指数上升幅度最为显著。这表明这两省的生活、生产和生态环境 3 个子系统实现了同步协调发展。在过去 20 年间,四川和云南在农业生态环境方面采取了系统性和协同性极强的发展战略,在政策执行力度、生态保护投入以及农业可持续发展战略的实施上更为积极,从而显著提升了其协调发展能力和水平。与此同时,中上游大部分省份的协调性与长江经济带的整体变化趋势保持一致,在后 10 年基本稳定在中度协调水平,说明长江经济带区域内大部分省份在农业生态环境协调发展方面具有较强的同步性。

然而,下游地区的一些省市却出现了协调指数变化幅度较大的情况。特别是浙江和江苏两省的协调等级由中度协调下降到基本协调,上海的协调等级更是由基本协调下降到轻度失调,甚至在一段时间内下降到中度失调。该现象表明,尽管长江经济带在农业生态环境协调发展方面取得了整体上的显著进展,但部分地区仍面临挑战,可能这些地区更侧重于发展高端制造业和服务业,对农业生态环境的关注度和投入不足,对农业生态环境改善造成了一定的冲击。

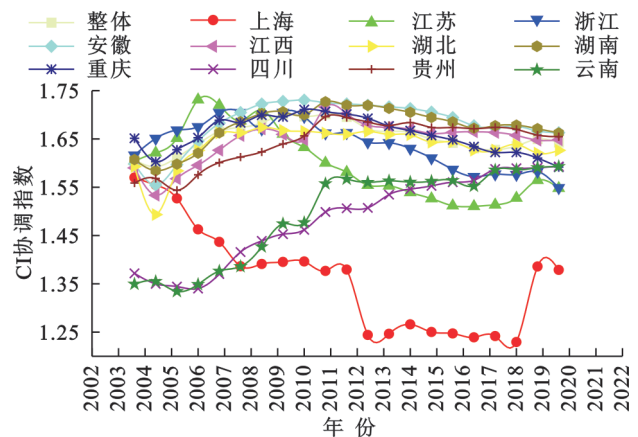


图 4 各省市 CI 系统协调指数 1.20~1.74 区间细化图
Fig. 4 Detailed view of system coordination index (CI) for each province and city within range of 1.20~1.74

2.3 农业生态环境协调性的空间自相关分析

2.3.1 全局莫兰指数(Global Moran's I) 为探究长江经济带各省的农业生态环境协调性是否具有空间关联性,运用前文计算的 2002—2022 年各省份 CI 系统协调指数数据,采用全局莫兰指数对长江经济带农业生态环境协调性的空间聚集效应进行分析(表 3)。

表3 长江经济带2002—2022年农业生态环境协调性的
Global Moran's *I*
Table 3 Global Moran's *I* of agricultural ecological
environment coordination in Yangtze River
Economic Belt (2002—2022)

年份	Moran's <i>I</i>	<i>z</i> 得分	<i>p</i> 值
2002	0.000074	0.545247	0.585584
2003	-0.102914	-0.015063	0.987982
2004	0.029088	0.677057	0.498370
2005	-0.062582	0.188081	0.850813
2006	-0.096114	0.019099	0.984762
2007	-0.105570	-0.027240	0.978268
2008	-0.100303	-0.001488	0.998813
2009	-0.148110	-0.239434	0.810769
2010	-0.176685	-0.382122	0.702371
2011	-0.057480	0.228603	0.819177
2012	-0.047862	0.282433	0.777611
2013	-0.003288	0.621355	0.534366
2014	0.002805	0.704353	0.481213
2015	0.030316	0.869972	0.384316
2016	0.053064	1.064864	0.286937
2017	0.111827	1.466040	0.142637
2018	0.120079	1.561006	0.118522
2019	0.142814	1.855115	0.063580*
2020	0.124926	1.836900	0.066225*
2021	0.103967	1.433838	0.151619
2022	0.185146	1.837855	0.066084*

注:该表为ArcGIS 10.8软件中的空间统计工具运行的结果,表中“*”标注的 $p < 0.1$ 。

表3中Moran's *I*的取值区间通常为 $[-1, 1]$,如果运行结果接近于0,表示长江经济带各省份之间农业生态环境协调性不存在全局空间自相关现象,空间分布是随机的;若运行结果大于0,表示长江经济带邻近省份的农业生态环境协调性呈正自相关,呈高一高或低—低聚集类型;若运行结果小于0,表示长江经济带邻近省份的农业生态环境协调性呈负自相关,呈高一低或低—高聚集类型。当 $p < 0.1$ 即显著性水平为10%的水平上, z 得分区间为 $(-1.96, -1.65)$ 或 $(1.65, 1.96)$ 才表示通过显著性检验。

从表3看出,2002—2022年长江经济带农业生态环境协调性全局Moran's *I*指数取值为 $-0.176\ 685 \sim 0.185\ 146$,其中2002—2018年及2021年的 p 值大于0.1,全局Moran's *I*指数和 Z 得分基本上呈现由负转正的增长趋势,说明长期以来长江经济带11省的农业生态环境协调性均没有通过显著性检验;可见2019年、2020年、2022年 p 值小于0.1,全局Moran's *I*

指数大于0, Z 得分在 $(1.65, 1.96)$ 区间内,因此均在10%的显著性水平上通过了显著性检验,说明2019年、2020年、2022年这三年长江经济带各省份的农业生态环境协调性存在显著的空间正自相关性。且2022年全局Moran's *I*指数最大为0.185 146,说明2022年各省份之间农业生态环境协调性的空间关联性最大,空间聚集效应最强。

综上所述,长江经济带各省之间的农业生态环境协调性从2002—2018年间没有通过显著性检验到近几年2019年、2020年、2022年在10%的显著性水平上通过了显著性检验的变化,呈现了研究期间内长江经济带各省之间的农业生态环境协调性由随机分布、空间差异小到有明显关联性、相互影响的动态变化过程。前期2002—2018年具有随机分布的属性,不存在明显的离散和集聚效应,表明各省之间的农业生态环境协调性相对独立,缺乏系统性的相互影响;近几年,农业生态环境协调性通过显著性检验,全局Moran's *I*指数和 Z 得分也基本呈现由负转正的增长趋势,各省的农业生态环境协调性逐渐增强,尤其在2022年,空间关联性达到最大,表明各省之间的相互影响和依赖关系日益明显。从随机分布转向明显的空间关联性变化,彰显了长江经济带农业生态环境区域协同发展的向好态势,可见近年来多次长江经济带发展座谈会商定的政策导向,通过区域内农业政策协同、资源共享及生态保护意识的提升,推动区域内农业生态环境协调性的可持续发展。

2.3.2 局部莫兰指数(Local Moran's *I*) 为了更准确地描述长江经济带内局部各省份与其相邻省份之间的空间关联度,探究农业生态环境协调性是否存在空间异质性和异常点,通过ArcGIS 10.8软件中的空间统计工具进行局部莫兰指数分析,得到2002—2022年典型年份即每隔5年的LISA聚集图(图5)。

从2002—2022年每隔5年的LISA图可看出,长江经济带各省份的农业生态环境协调性呈无显著性、高一高聚集、低—低聚集和低—高聚集4种类型(图5)。长江经济带农业生态环境协调性空间异质性在前15年主要出现在中游地区,2017年以后开始向下游地区转移;大部分无显著性区域主要集中在上游和下游部分,这些地区的农业生态环境协调性虽然未表现出明显的聚集趋势,但并不意味着这些省份的协调性不高,无显著性地区普遍存在的问题是区域间联动性不强,没有形成有效的区域合作机制。

具体而言,在中游地区,尤其是湖北从2002—2022年主要呈现为高一高(H—H)聚集,说明湖北、江西、湖南等中游省份形成了农业生态环境协调性的“强

联动”格局,中游地区农业生态环境协调性发展联动性强尤其是湖北省空间聚集效应最强,可见中游区域协调性发展趋势最好,区域间相互带动。在下游地区,低—低(L—L)聚集区在2017年以后主要分布于浙江省,其系统协调指数CI值从2017年的1.586 9到2022年的1.548 8,下降幅度较大普遍高于周边省份,可见

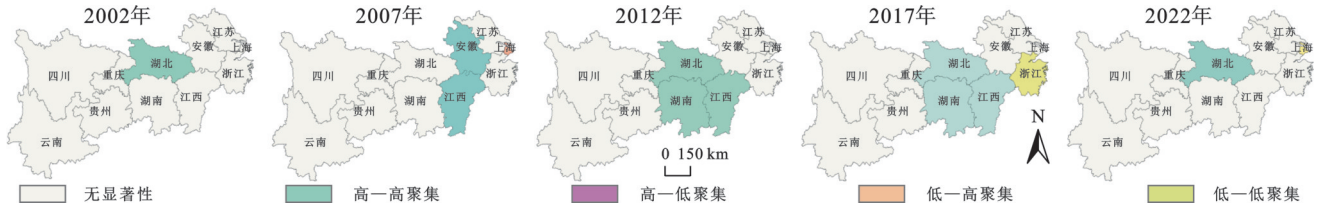


图5 长江经济带典型年份农业生态环境协调性的LISA图空间分异状况

Fig. 5 LISA-based spatial differentiation of agricultural ecological environment coordination in Yangtze River Economic Belt in typical years

3 讨论

3.1 创新性

(1) 纵向对比,时间序列创新。一是农业环境拐点对比:本文指出长江经济带可持续性指数后10年增长翻番,而相关研究发现全国农业碳排放拐点出现在2016年^[28]。两者对比表明,长江经济带的可持续性提升(2012年后加速)领先于全国平均水平,凸显区域绿色农业政策的先导性。二是协调性差异:本文观察到2012—2019年协调指数下降,反映出农业面源污染治理长期缺乏系统法律规制的现实困境;而近3年指数呈现回升趋势,与农业面源污染治理政策强化时段(2021—2025年)相吻合,进一步验证了系统的法治化治理在农业面源污染管控中的积极效果。

(2) 横向对比,区域差异有新发现。一是湖北形成了“强联动”格局。揭示流域协同治理能够有效突破治理碎片化的困境,湖北在流域协同治理方面的积极探索,通过跨区域合作和资源整合,实现了环境治理的高效联动,显著提升了区域整体的环境治理效能。二是下游协调性逆势下跌。该现象可能与长三角地区工业下乡污染转移直接相关,特别是浙江省的“低—低聚集”现象可能源于该省部分农村污水处理效果不够理想,印证了一些城市的技术和管理模式未能有效适应农村地区的实际情况,导致污水处理等基础设施建设滞后,进而影响了整体的环境治理效果。

(3) 方法创新,空间分析有突破。传统研究在分析农业环境问题时,多采用单一指数法,相比之下,本文在方法上进行了一定创新,结合了熵值法、空间自相关分析以及协调度模型,综合方法的应用突破了传统单一指数法的局限,从空间维度揭示了长江经济带农业环境的转型特征。这一转型表明区域间农业生态环境问题呈现明显的空间关联性和协同

浙江省近几年农业生态环境协调性发展不良;低—高(L—H)聚集区仅2007年分布于上海市,从图5看出2007年上海市的系统协调指数CI值1.386 3为一个转折分界点,之后上海CI值一直远低于其他省份,一度处于中度失调水平,可见早期上海市的农业生态环境协调性波动性较大甚至影响了周边省份协同发展。

性。因此,传统的碎片化治理模式已难以适应当前农业生态环境问题的变化趋势,跨省市的协同治理成为必然选择。

3.2 不足与局限性

(1) 指标体系的部分疏漏。现有指标体系虽较全面,仍存在一些重要指标的缺失问题。例如未充分纳入生物多样性、土壤健康等核心要素,这些指标对农业生态环境可持续性的综合评估具有关键意义。

(2) 空间分析的深度不足。由于自然条件、经济水平及政策环境的区域差异,农业生态环境的空间分布机制可能比现有模型呈现得更复杂,现有模型未充分考量空间异质性与非平稳性的影响。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 2002—2022年长江经济带农业生态环境整体可持续性指数稳步提升,后10年增长趋势基本上比前10年翻一番。生活环境子系统的变化幅度基本跟随整体变化趋势,提升幅度在3个子系统中最大,生产环境子系统变化趋势最平缓,主要受到正负向指标变动的影 响,对整体水平的影响最低。但各省市之间存在明显差异,中游地区增长最快,下游最慢,上游地区介于两者之间,区域差异扩大。

(2) 2002—2022年长江经济带农业生态环境协调性整体上处于平稳状态,从基本协调水平提升到高度协调。在前10年内,3个子系统的基数都处于低水平,2012—2019年协调指数出现逐年下降的趋势,近3年协调性有小幅回升。大部分省份在农业生态环境的协调指数和整体保持一致性,呈现出比较均衡的发展态势。上海、浙江、江苏下游省市的协调指数在逆向下跌,云南、四川上游两省的协调指数上涨趋势最明显,上游的农业生态环境的协调发展水平

明显优于下游地区。

(3) 全局莫兰指数从2002—2018年长期以来没有通过显著性检验到近几年(2019年、2020年、2022年)通过了显著性检验,整体上从早期的随机分布转向了明显的空间关联性。局部莫兰指数上下游无显著性,但中游地区尤其湖北省呈现为高一高聚集,形成“强联动”格局,下游地区的浙江省则呈现低—低聚集,协调性发展态势不良。

4.2 建议

(1) 因地制宜,多产业融合发展。在长江经济带这个气候多样、地形复杂的区域,要遵循因地制宜原则,积极探索多产业融合发展。根据长江经济带不同地区的自然条件、地形气候特点和其他资源禀赋,科学合理地选择适宜的农业生产方式和作物种植模式,实现农业生产的多元化和可持续发展。还可以将农业与其他产业相结合,实现生态环境的综合利用和产业的互补性发展,可以将农业与畜牧业、渔业、林业等产业的结合,延伸整合农林牧渔复合型产业链;也可以和旅游业、制造业等二三产业融合,比如生产加工农副产品和乡村旅游等等。

(2) 科学统筹,多系统协调提升。生态和生产环境子系统明显还有大幅度改进空间,多系统协调提升需要在战略大局上做好科学统筹,从而实现生活、生产、生态环境子系统三者有机结合,促进长江经济带农业的可持续发展。近些年长江经济带的农业生态环境问题尤为突出,水土流失、水质污染、生物多样性丧失等问题严重影响着农业生产的稳定性和持续性。因此,必须加强生态环境保护,推动生态农业的发展,实现农业生产与生态环境的良性互动。农业生产过程中的化肥农药地膜过量施用导致农业面源污染、农田水利设施不完善等问题严重损害了生态环境,需要加强农业生产的管理和技术支持,推动农业生产方式的转变,实现高效优质、绿色环保的农业生产。

(3) 区域合作,多省市均衡互补。长江经济带不同省市之间的资源禀赋和农业生态环境条件各异,上游地区的生态环境要明显优于中下游地区,通过区域间合作可以实现优势互补和跨区域的环境治理保护,比如赣湘鄂中游三省协同发展、云贵川三省共治赤水河流域。参考湖北省“强联动”格局,长江流域多省市的合作可以促进农业科技创新、农产品流通和市场拓展,通过合作实现不同省市农产品的互补性,拓展市场空间。此外,区域合作还可以促进农业企业的合作发展,推动农业产业链的延伸和升级,实现农业产业的跨区域发展。多省市应加强合作交流,均衡提升长江经济带农业生态环境的协调性。

(4) 生态治理,多主体协同共治。生态治理只有各地政府、农民、企业等多方主体协同共治,形成合力,才能有效提升长江经济带农业生态环境的可持续性和协调性。中央政府应当加强国家政策引导和监管,推动农业生态环境治理工作;地方政府应当加大投入农业生态环境保护和修复工作,促进各地域农业生态环境可持续发展。农民作为农业生态环境的直接参与者,要增强生态保护、绿色发展意识,采取适当施肥、节约用水、科学种植、发展有机农业等措施,实现农产品经济效益和生态效益的双赢。企业作为重要参与者,应当履行社会环保责任,通过技术创新、产业升级等方式降低对农业生态环境的影响。

参考文献(References):

- [1] 陶声婷,景晓栋,王雨璇.生态价值视角下长江经济带农业绿色生态效率时空演变及其影响因素研究[J].江西农业学报,2024,36(7):108-116.
Tao S T, Jing X D, Wang Y X. Study on spatio-temporal evolution and influencing factors of agricultural green ecological efficiency in Yangtze River Economic Belt from perspective of ecological value [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2024,36(7):108-116.
- [2] 杨和平,李红波.农业新质生产力对耕地利用生态效率的影响:以长江经济带为例[J].中国土地科学,2024,38(11):94-104.
Yang H P, Li H B. Impact of agricultural new quality productivity on ecological efficiency of cultivated land use: a case study of the Yangtze River Economic Belt [J]. China Land Science, 2024,38(11):94-104.
- [3] 赵霞,孔垂婧,温宏坚,等.国内外关于生态环境可持续性指标的评述[J].西北大学学报:哲学社会科学版,2014,44(3):136-145.
Zhao X, Kong C J, Wen H J, et al. A review of the sustainable index of ecology at home and abroad [J]. Journal of Northwest University: Philosophy and Social Sciences Edition, 2014,44(3):136-145.
- [4] Popescu L, Safta A S. Considerations regarding improving the ecological and environmental performance of agriculture [J]. Proceedings of the International Conference on Business Excellence, 2020,14(1):697-707.
- [5] 中国科学院可持续发展战略研究组.2010中国可持续发展战略报告绿色发展与创新[M].北京:科学出版社,2010.
Chinese Academy of Sciences Sustainable Development Strategy Research Group. China sustainable development strategy report 2010[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [6] 岳思好,谈存峰,杨林娟,等.甘肃省泾河流域2010—2019年农村生态环境质量分析及预测[J].水土保持通报,2021,41(5):365-372.

- Yue S Y, Tan C F, Yang L J, et al. Analysis and prediction on rural eco-environmental quality of Jinghe River Basin in Gansu Province during 2010-2019 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(5):365-372.
- [7] 彭鹏, 顾丹丹, 周国华. 湖南省乡村人居环境脆弱性格局变化及响应指数的影响机制 [J]. *经济地理*, 2022, 42(6):168-178.
- Peng P, Gu D D, Zhou G H. Spatio-temporal pattern of rural human settlement vulnerability and influencing mechanism of response index in Hunan Province [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(6):168-178.
- [8] 侯彩霞, 祝永芳. 基于 SES-PSR 模型的沙漠化逆转区社会-生态系统恢复力评价和预测: 以宁夏盐池县为例 [J]. *中国沙漠*, 2024, 44(6):277-286.
- Hou C X, Zhu Y F. Social-ecological system resilience assessment of desertification reversal area based on SES-PSR model: a case study of Yanchi, Ningxia, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(6):277-286.
- [9] 向书坚, 宋丽影, 郑瑞坤. 中国乡村“三生”融合发展空间关联网络特征及其形成机制 [J]. *生态学报*, 2025, 45(7):3092-3110.
- Xiang S J, Song L Y, Zheng R K. Exploring the characteristics and formation mechanism of spatial correlation network for the harmonious symbiosis development of rural ‘production-living-ecology’ in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(7):3092-3110.
- [10] 罗光强, 陈香香. 粮食主产区“三生”功能与粮食生产可持续发展 [J]. *农林经济管理学报*, 2023, 22(6):671-681.
- Luo G Q, Chen X X. ‘Production-living-ecology’ function of main grain producing areas and sustainable development of food production [J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2023, 22(6):671-681.
- [11] 程哲, 余侃华, 罗平平, 等. 陕南乡村循环产业“三生共融”发展的作用机制与路径选择 [J]. *农业工程学报*, 2025, 41(1):248-257.
- Cheng Z, Yu K H, Luo P P, et al. The mechanism and path selection of the development of rural circular industry ‘production-living-ecological integration’ in southern Shaanxi [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(1):248-257.
- [12] 李慧, 魏兴萍, 李良鑫. 基于 InVEST-FLUS 模型的岩溶区和非岩溶区“三生空间”碳储量对比 [J]. *农业工程学报*, 2025, 41(3):251-262.
- Li H, Wei X P, Li L X. Carbon storage comparison of ‘production-living-ecological space’ in karst and non-karst areas based on the InVEST-FLUS model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(3):251-262.
- [13] 赵文珺, 刘丽红. 山西省农业生态经济系统协调发展及障碍因子分析 [J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(10):179-190.
- Zhao W J, Liu L H. Analysis on the coordinated development and obstacle factors of agricultural eco-economic system in Shanxi Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(10):179-190.
- [14] 丁磊, 吕剑平. 基于熵权法测度甘肃省农业经济和农业生态的耦合性 [J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(3):151-158.
- Ding L, Lu J P. Measuring the coupling of agricultural economy and agricultural ecology in Gansu Province based on entropy weight method [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(3):151-158.
- [15] 侯宇, 王莹, 石惠惠, 等. 粮食主产区低碳农业耦合协调分析: 基于农业碳排放效率的视角 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(12):2022-2033.
- Hou Y, Wang Y, Shi H H, et al. Coupling and coordination analysis of low-carbon agriculture in major grain-producing areas: from the perspective of agricultural carbon emission efficiency [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(12):2022-2033.
- [16] 李文颜, 李良鑫, 邵景安. 水土保持政策与农业生态效率耦合协调关系及其驱动因素 [J]. *水土保持通报*, 2025, 45(1):393-404.
- Li W Y, Li L X, Shao J A. Coupling coordination relationship between soil and water conservation policy, agricultural eco-efficiency, and its driving factors [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(1):393-404.
- [17] 朱世友, 万光彩. 农业生态经济系统协调度及时空演化研究: 以安徽省为例 [J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(4):203-213.
- Zhu S Y, Wan G C. Study on the coordination degree and spatial-temporal evolution of agricultural eco-economic system: a case study of Anhui Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(4):203-213.
- [18] 李明贤, 贺佳斌. 数字经济赋能农业高质量发展研究: 基于湖南省 2012—2020 年面板数据的分析 [J]. *湖南农业大学学报: 社会科学版*, 2023, 24(1):14-23.
- Li M X, He J B. Research on digital economy enabling high-quality agricultural development: based on the analysis of panel data of Hunan Province from 2012 to 2020 [J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Social Sciences*, 2023, 24(1):14-23.
- [19] 李雪, 顾莉丽, 李瑞. 我国粮食主产区粮食生产生态效率评价研究 [J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(2):205-213.
- Li X, Gu L L, Li R. Study on evaluation of eco-efficiency of grain production in major grain-producing areas of China [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(2):205-213.
- [20] 罗家祺, 金晓斌, 刘晶, 等. 2000—2020 年苏北地区农业生态效率变化及其影响因素分析 [J]. *农业工程学报*, 2023, 39(15):239-248.
- Luo J Q, Jin X B, Liu J, et al. Process and influencing

- factors of agricultural eco-efficiency in northern Jiangsu of China from 2000 to 2020[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(15): 239-248.
- [21] 杜欢政,刘香玲,王韬.农业废弃物资源化利用对农村能源可持续性影响研究:以黄河流域9省(区)60个地级行政区为例[J].农业资源与环境学报,2023,40(6): 1443-1451.
Du H Z, Liu X L, Wang T. Impact of agricultural waste energy utilization on rural energy sustainability in the Yellow River basin: based on data analysis of 60 prefecture-level administrative regions in nine provinces [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023,40(6):1443-1451.
- [22] 郭秀琪,李如霞,刘妍.河北省农业现代化发展水平、区域差异及障碍因素分析[J].中国农业资源与区划, 2024,45(3):207-217.
Guo X Q, Li R X, Liu Y. Analysis on the development level, regional difference and obstacle factors of agricultural modernization in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024,45(3):207-217.
- [23] 洪雅芳,叶夏,郑昆崧,等.福建省县域农业可持续发展水平研究[J].中国农业资源与区划,2017,38(2):152-158.
Hong Y F, Ye X, Zheng K J, et al. The agricultural sustainable development level of counties in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017,38(2):152-158.
- [24] 刘晓琼,刘佳琪,郑好,等.黄河中游矿区可持续农业与农村发展研究:以神府煤田典型村域为例[J].西北大学学报:自然科学版,2022,52(3):402-415.
Liu X Q, Liu J Q, Zheng H, et al. Sustainable agriculture and rural development in mining areas of the middle reaches of the Yellow River: taking typical villages in Shenfu coalfield as case study[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2022, 52 (3) : 402-415.
- [25] 卓娜,柴智慧.乡村生态振兴背景下农业绿色发展路径研究:基于农业绿色发展先行区的案例[J].农业经济, 2023(7):7-11.
Zhuo N, Chai Z H. Study on the path of agricultural green development under the background of rural ecological revitalization: Based on the case of the pioneering area of agricultural green development[J]. Agricultural Economy, 2023(7):7-11.
- [26] 唐健飞,刘剑玲.省域农业可持续发展水平评价及其耦合协调分析:以长江经济带11省市为例[J].经济地理, 2022,42(12):179-185.
Tang J F, Liu J L. Evaluation and coupling coordination analysis of provincial agricultural sustainable development: a case of 11 provinces in the Yangtze River Economic Belt [J]. Economic Geography, 2022, 42 (12):179-185.
- [27] 金贵,贺念慈,刘志远,等.共享社会经济路径下长江经济带国土空间模拟预测与布局优化[J].生态学报, 2024,44(18):8084-8093.
Jin G, He N C, Liu Z Y, et al. Simulation prediction and layout optimization of territorial space in the Yangtze River Economic Belt under the shared socio-economic pathways [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44 (18):8084-8093.
- [28] 丁宝根,杨树旺,赵玉,等.中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究[J].中国土地科学,2019,33(12):45-54.
Ding B G, Yang S W, Zhao Y, et al. Study on spatio-temporal characteristics and decoupling effect of carbon emission from cultivated land resource utilization in China[J]. China Land Science, 2019,33(12):45-54.

(上接第289页)

- [25] Smith S E, Read D. Mycorrhizal symbiosis [M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2008
- [26] Chen B D, Xiao X Y, Zhu Y G, et al. The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* gives contradictory effects on phosphorus and arsenic acquisition by *Medicago sativa* Linn[J]. Science of the Total Environment, 2007,379(2/3):226-234.
- [27] Wang F Y, Lin X G, Yin R, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on the growth of *Elsholtzia splendens* and *Zea mays* and the activities of phosphatase and urease in a multi-metal-contaminated soil under unsterilized conditions[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 31(1/2):110-119.
- [28] Zhang L, Fan J Q, Ding X D, et al. Hyphosphere interactions between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate solubilizing bacterium promote phytate mineralization in soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014,74:177-183.
- [29] Verbruggen E, Van Der Heijden M G A, Weedon J T, et al. Community assembly, species richness and nestedness of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils [J]. Molecular Ecology, 2012,21(10):2341-2353.
- [30] van der Heijden M G A, Bardgett R D, van Straalen N M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems [J]. Ecology Letters, 2008,11(3):296-310.